

УДК 629.413-592.112

DOI: 10.18372/0370-2197.4(85).13865

Н. А. ВОЛЬЧЕНКО¹, И. О. БЕКИШ², Е. С. ФЕДОТОВ¹, П. С. КРАСИН¹¹Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия²Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

МНОГОФАКТОРНЫЙ МЕТОД ПОДБОРА ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрено связь работы выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения и их поверхностной температуры от импульсных удельных нагрузок, действующих на пятна контактов микровыступов. Проведен анализ температур, возникающих на поверхностях пятен микровыступов при различных типах контакта в процессе фрикционного взаимодействия. Проиллюстрировано влияние упругой деформации поверхностных слоев материалов элементов трения и пластических деформаций процессов без и с насыщенной плотностью дислокаций на изменение поверхностной температуры, удельных нагрузок и работу выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения. Приведены усредненные экспериментальные значения трибоЭДС для Al, Ni, Fe и Cu. Одной из основных задач трибологии является оценка энергетических характеристик поверхностных слоев пар трения тормозных устройств. Фундаментальной проблемой изучения рабочих поверхностей металлических фрикционных элементов (тормозных шкивов, барабанов и дисков) является контроль параметров, которые связаны между собой термодинамическими соотношениями. Сопоставление величин трибоЭДС для всех исследуемых металлов дало возможность составить ряд, в котором всякий последующий металл более электроотрицателен, чем предыдущий. Для эталона из никеля ряд имеет следующий вид: Fe, Mo, Zn, Al, Cu, Ti, Pb. Сопоставление величин от максимальных до минимальных параметров (ρ – плотность; c – теплоемкость; λ , α – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности) для всех исследуемых металлов позволило составить ряды. Первый (для ρ): Mo, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ti, Al; второй (для c): Al, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Mo, Pb; третий (для λ): Cu, Al, Mo, Zn, Fe, Pb, Ni, Ti; четвертый (для α): Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Fe, Ti. Таким образом, анализ трибоэлектрических характеристик металлов показал, что в сплавах на основе железа, можно ожидать изменение трибоЭДС в зависимости от вида легирующих элементов и их количества в сплаве. А многофакторный метод подбора фрикционных материалов пар трения тормозных устройств позволил сформировать ряды по трибоЭДС и теплофизических характеристик различных металлов позволяет уменьшить скачки разности потенциалов за счет нового подхода к рецептуре примесных компонентов в металлических фрикционных изделиях.

Ключевые слова: тормозные устройства, пары трения, фрикционный материал, трибоЭДС, потенциал.

Введение. Одной из основных задач трибологии является оценка энергетических характеристик поверхностных слоев пар трения тормозных устройств. Фундаментальной проблемой изучения рабочих поверхностей металлических фрикционных элементов (тормозных шкивов, барабанов и дисков) является контроль параметров, которые связаны между собой термодинамическими соотношениями. При этом необходимо заметить, что в металлических фрикционных элементах промежуточные слои, структуры, примеси и точечные дефекты на границе раздела не под-

даются контролю в технологическом процессе их производства. Хаотическое расположение легирующих примесей в составе структуры металлических фрикционных элементов во взаимодействии с другими компонентами структуры создают заметные скачки термо ЭДС, которые способствуют флуктуации ряда параметров: удельных нагрузок, динамических коэффициентов трения, поверхностных температур и др. Следует заметить, что при этом наблюдается заметное изменение температурного, электрического и химического потенциалов.

Постановка задачи исследований заключается в формировании рядов по трибоЭДС и теплофизических характеристиках различных металлов, используемых для изготовления металлических фрикционных элементов тормозных устройств с целью уменьшения скачков потенциалов.

Физической основой трибоэлектрических явлений считается контактные явления, при которых в момент фрикционного взаимодействия пар «металл – металл», «металл – полимер», «полимер – полимер», «полупроводник – полупроводник» и других от их поверхностей наблюдается переход электронов и ионов от одного элемента трения к другому. При этом на границе раздела трущихся тел образуется скачек потенциала равный разности энергетических уровней Ферми двух материалов ($F_1 - F_2$) при их контактировании. Этот скачек потенциала препятствует преобладающему переходу электронов проводимости от одного элемента пары трения к другому, в результате чего, между рабочими поверхностями этих элементов возникает контактная разность потенциалов, равная разности работ выхода электронов из этих материалов. «ФК-24А-сталь 35ХНЛ»).

Рассмотрим связь работы выхода электронов и ионов с рабочими поверхностями металлополимерных пар трения и их поверхностной температуры от импульсных удельных нагрузок, действующих на пятна контактов микровыступов (рис. 1). При этом поверхностные температуры полимерных накладок были ниже (рис. 1 а, б, в) и выше (рис. 1, г) допустимой для их материалов, несмотря на то, что в контактах взаимодействия температуры были одинаковыми.

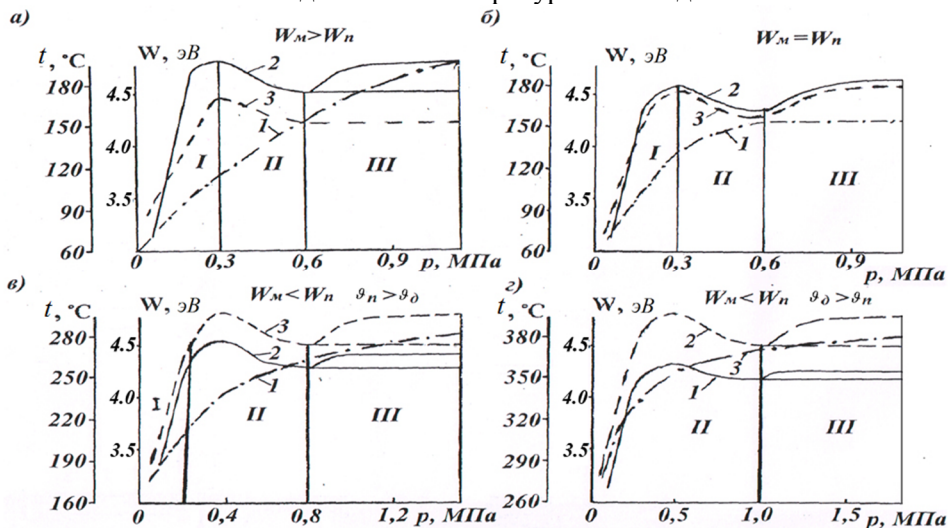


Рис. 1. Закономерности изменения работы выхода электронов и ионов с рабочими поверхностями металлополимерных пар трения (кривая 1) и их поверхностной температуры ниже (а, б, в) и выше допустимой (г) для материалов накладки (кривая 2) от импульсных удельных нагрузок (кривая 3), действующих на пятна контакта микровыступов

Проведем анализ температур, возникающих на поверхностях пятен микровыступов при различных типах контакта в процессе фрикционного взаимодействия (рис. 1). Участок I соответствует, в основном, области упругой деформации поверхностных слоев материалов элементов трения, а участки II и III – преимущественно, области пластических деформаций процессов без и с насыщенной плотностью дислокаций.

Участок I на рис. 1, *в* смещен влево, а на рис. 1, *з* участок I вообще отсутствует, расширяясь при этом на участке II. Объясняется это тем, что в первом случае начинаются деструктивные процессы выгорания связующих компонентов материалов в поверхностных слоях полимерной накладке и имеет место образование пятен жидкости на ее поверхности, а во втором случае – деструктивные процессы заканчивающиеся увеличением количества пятен жидкости на рабочей поверхности полимерной накладки. Третий участок на всех рисунках характеризуется динамическим равновесием между процессами размножения и ангильции дефектов с образованием микропар и микротрещин в поверхностных слоях металлополимерных пар трения. При этом толщина теплового слоя при больших импульсных удельных нагрузках в металлополимерных парах трения на один-два порядка превышает толщину поверхностного и подповерхностного слоев их элементов.

Проиллюстрируем, как влияют указанные выше три участка на изменение поверхностной температуры, удельных нагрузок и работу выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения. Последний параметр является определяющим и в значительной мере влияет на первых два параметра. На участке I (рис. 1, *а*) наблюдается увеличение работы выхода как электронов, так и ионов с ростом удельных импульсных нагрузок.

В результате изменений, которые происходят на рабочих поверхностях металлополимерных пар трения, работа выхода электронов и ионов с поверхностей трения уменьшается (рис. 1). Что касается графических зависимостей, представленных на рис. 1, *в*, *з*, то наличие жидкой фазы вызывает увеличение удельных нагрузок в парах трения. Работа выхода ионов на них больше работы выхода электронов в связи с эффектом сродственности к электрону (преобразование электронов в ионы). Как видно из рис. 1 поверхностная температура монотонно увеличивается в данном диапазоне удельных нагрузок, не имеет экстремумов и коррелируется с работой выхода электронов и ионов.

Однако на III-их участках (рис. 1, *б*, *з*) при $W_M = W_{II}$ и $W_M < W_{II}$ в интервале температур, соответственно, ниже и выше допустимой для материалов полимерной накладки имели место постоянная и термостабилизационная температура. Первая возникает тогда, когда кратковременно количества теплоты, генерируемая на поверхностях трения, отводится от матовых поверхностей металлического фрикционного элемента в окружающую среду. Термостабилизационное состояние металлического фрикционного элемента наступает на продолжительное время тогда, когда градиент температуры минимальный по толщине его полированной поверхности.

Однако проведение исследования не дают ответы на вопросы как влияет: каждый в отдельности легирующий элемент на работу выхода электронов; тот или иной теплофизический параметр легирующего элемента на состояние фрикционного элемента.

На первом этапе работы были исследованы образцы чистых металлов: от самого легкого – алюминия, до самого тяжелого – никеля. В качестве эталонного

металла использовали стержни из Al, Ni, Fe и Cu. Известно, что эти металлы имеют различную работу выхода электронов, плотность свободных носителей и энергию Ферми [1; 3; 4]].

В табл. 1 приведены усредненные экспериментальные значения трибоЭДС металлов для вышеперечисленных эталонов. Кроме того, для использованных металлов, в таблицу внесены значения работы выхода электронов φ_F , энергия Ферми E_F и плотность электронов проводимости N/V .

Из приведенных в табл. 1 данных видно, что величина и знак трибоЭДС для всех контролируемых металлов различна и зависит от их природы и эталонного металла. Наименьшие значения контактной разности потенциалов оказались для алюминиевого эталона, а наибольшие – для меди

Таблица 1

Трибоэлектрические и электронные свойства металлов

Металл	φ_F , эВ	E_F эВ	N/V 10^{28} м^{-3}	ТрибоЭДС, мкВ, для эталонов из Cu, Fe, Ni, Al			
				Al	Ni	Fe	Cu
Al	4,25	11,7	18,1	0	+34	+40	-30
Ti	3,95	-	-	-6	+16	+36	-10
Fe	4,31	11,1	17,0	+24	+80	0	+40
Ni	4,50	-	-	-24	0	-28	-32
Cu	4,40	7,0	8,47	+4	+20	+100	0
Zn	4,24	9,47	13,2	+6	+40	+18	-25
Mo	4,30	-	-	+8	+48	+32	+45
Pb	4,00	9,47	13,2	-0,4	-20,8	+15	-30

В табл. 1 использованы следующие обозначения: φ_F – работа выхода электронов, эВ; E_F – энергия Ферми; N/V – плотность электронов проводимости.

Известно [5; 6], что абсолютная величина трибоэлектрического потенциала пропорциональна разности работ выхода электронов $\delta\varphi_F$ из фрикционного взаимодействия материалов. Так, если разность $\delta\varphi_F$ для никеля, по отношению к алюминию, составляет 0,25 эВ, то трибоЭДС у этих металлов различается на 50 мкВ. Однако в некоторых случаях контактная ЭДС напрямую зависит от работы выхода электронов.

Например, для железа и молибдена работы выхода электронов близки (4,31 и 4,30 эВ, соответственно), а трибоЭДС сильно различается, как для медного, так и для никелевого эталонов.

Сопоставление величин трибоЭДС для всех исследуемых металлов дало возможность составить ряд, в котором всякий последующий металл более электроотрицателен, чем предыдущий. Для эталона из никеля ряд имеет следующий вид: Fe, Mo, Zn, Al, Cu, Ti, Pb. Этот ряд заметно отличается от рядов Фарадея, Вольта, и Гезехуса [2].

Таким образом, анализ трибоэлектрических характеристик металлов показал, что в сплавах на основе железа, можно ожидать изменение трибоЭДС в зависимости от вида легирующих элементов и их количества в сплаве.

В табл. 2 приведены теплофизические характеристики металлов, которые часто встречаются в качестве примесей в материалах металлополимерных пар трения тормозных устройств.

Сопоставление величин от максимальных до минимальных параметров (ρ – плотность; c – теплоемкость; λ , α – коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) для всех исследуемых металлов позволило составить ряды. Первый (для ρ): Mo, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ti, Al; второй (для c): Al, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Mo, Pb; третий (для λ): Cu, Al, Mo, Zn, Fe, Pb, Ni, Ti; четвертый (для α): Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Fe, Ti.

Таблица 2

Теплофизические характеристики металлов

Металлы	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$	$\alpha \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
Fe	0	7900	0,44	74,5	21,42
	400	9100	0,523	48,5	10,26
	800	10900	0,645	30,8	4,38
Mo	0	10250	0,251	141	54,8
	400	10650	0,264	129	45,9
	1000	10750	0,281	104	34,4
Zn	0	7150	0,385	112,8	41,0
Al	0	2680	0,894	209	87,2
	400	2740	0,913	213	85,1
	300	2810	0,953	225	84,1
	500	2840	0,996	235	83,1
Cu	0	8950	0,389	393	112,9
	400	9000	0,406	365	100,1
	1000	9150	0,431	326	81,1
Ti	20	4500	0,528	15,1	6,36
	100	4500	0,544	15,7	6,41
	300	4500	0,586	16,9	6,41
	500	4500	0,616	18,0	6,49
Ni	0	8100	0,427	61,6	17,81
Pb	0	7250	0,222	66,0	41,1

Таким образом, знание рядов трибоЭДС и теплофизических характеристик различных металлов позволяет применять новый подход к рецептуре легирующих элементов металлических фрикционных изделий.

Выводы. Таким образом, многофакторный метод подбора фрикционных материалов пар трения тормозных устройств позволил сформировать ряды по трибоЭДС и теплофизических характеристик различных металлов позволяет уменьшить скачки разности потенциалов за счет нового подхода к рецептуре примесных компонентов в металлических фрикционных изделиях.

Список литературы

1. Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник / В.С. Фоменко. – К. Наукова Думка, 1981, - 336 с.
2. Самсонов Г.В. Свойства элементов. Физические свойства. Справочник / Г.В. Самсонов. – М. Металлургия, 1976. – 600 с.
3. Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко – К. Наукова Думка, 1989. – 192 с.

4. Григорьев С.В. Применение термоэлектрического метода сортировки промышленных сталей / С.В. Григорьев, Н.В. Русанова, В.М. Ершов. – Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск: Ладо, 2008 - №27. – С. 324 – 329.

5. Сопронюк П.М. Диагностика материалов и сред. Энергетические характеристики поверхности слоев / П.М. Сопронюк, В.М. Юзевыч. – Львов: ФМИ им. Г.В. Карпенко НАН Украины, из-во «СПОЛОМ». – 2005. – 292 с. – 2005. – 292 с. – а укр. Яз.

6. Энергетические уровни различных типов контактов микровыступов пар трения / М.В. Киндрачук, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко, В.С. Скрыпник, А.В. Возный // Физ.-хим. механика материалов – 2018. - №6. – С.83 – 90.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2019.

М. О. ВОЛЬЧЕНКО, І. О. БЕКИШ, Є. С. ФЕДОТОВ, П. С. КРАСИН

БАГАТОФАКТОРНИЙ МЕТОД ПІДБОРУ ФРИКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПАР ТЕРТЯ ГАЛЬМОВИХ ПРИСТРОЇВ

У статті розглянуто зв'язок роботи виходу електронів та іонів з робочих поверхонь металополімерних пар тертя і їх поверхневої температури від імпульсних питомих навантажень, що діють на плями контактів микровиступів. Проведено аналіз температур, що виникають на поверхні плям микровиступів при різних типах контакту в процесі фрикційної взаємодії. Проілюстровано вплив пружної деформації поверхневих шарів матеріалів елементів тертя і пластичних деформацій процесів без і з насиченою густиною дислокацій на зміну поверхневої температури, питомих навантажень і роботу виходу електронів та іонів з робочих поверхонь металополімерних пар тертя. Наведено усереднені експериментальні значення трибоЕРС для Al, Ni, Fe і Cu. Однією з основних завдань трибології є оцінка енергетичних характеристик поверхневих шарів пар тертя гальмівних пристроїв. Фундаментальною проблемою вивчення робочих поверхонь металевих фрикційних елементів (гальмівних шківів, барабанів і дисків) є контроль параметрів, які пов'язані між собою термодинамічними співвідношеннями. Співставлення величин трибоЕРС для всіх досліджуваних металів дало можливість скласти ряд, в якому всякий наступний метал більш електронегативний, ніж попередній. Для зразка з нікелю ряд має такий вигляд: Fe, Mo, Zn, Al, Cu, Ti, Pb. Співставлення величин від максимальних до мінімальних параметрів (ρ - густина; c - теплоємність; λ , α - коефіцієнтів теплопровідності і температуропровідності) для всіх досліджуваних металів дозволило скласти ряди. Перший (для ρ): Mo, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ti, Al; другий (для c): Al, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Mo, Pb; третій (для λ): Cu, Al, Mo, Zn, Fe, Pb, Ni, Ti; четвертий (для α): Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Fe, Ti. Таким чином, аналіз трибоелектричних характеристик металів показав, що в сплавах на основі заліза, можна очікувати зміну трибоЕРС в залежності від виду легуючих елементів і їх кількості в сплаві. А багатофакторний метод підбору фрикційних матеріалів пар тертя гальмівних пристроїв дозволив сформувати ряди по трибоЕРС і теплофізичних характеристик різних металів, що дозволяє зменшити скачки різниці потенціалів за рахунок нового підходу до рецептури домішкових компонентів в металевих фрикційних виробках.

Ключові слова: гальмівні пристрої, пари тертя, фрикційний матеріал, трибоЕРС, потенціал.

Вольченко Николай Александрович – канд. техн. наук, доцент, заведуючий кафедри автосервіса и материаловедения Кубанский національний технологический университет 050-373-82-42, E-mail: divo99@ukr.net.

Бекиш Ирина Орестивна – канд. техн. наук, доцент кафедри инженерной и компьютерной графики, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 47 19, E-mail: ikg@nung.edu.ua.

Красин Павел Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведуючий кафедри автосервіса и материаловедения Кубанский национальный технологический университет.

Федотов Евгений Сергеевич – аспирант кафедри материаловедства та автосервіса Кубанского национального технологического университета.

N. A. VOLCHENKO, I. O. BEKISH, P. S. KRASIN, Ye. S. FEDOTOV

MULTIFACTOR METHOD OF SELECTION OF FRICTION MATERIALS OF FRICTION COUPLES OF BRAKE DEVICES

The article discusses the relationship between the work function of electrons and ions from the working surfaces of metal-polymer friction pairs and their surface temperature from pulsed specific loads acting on contact spots of microprotrusions. The analysis of temperatures arising on the surfaces of the spots of microprotrusion with various types of contact in the process of frictional interaction. The effect of elastic deformation of the surface layers of materials of friction elements and plastic deformations of processes without and with a saturated density of dislocations on changes in surface temperature, specific loads and the work function of electrons and ions from the working surfaces of metal-polymer friction pairs is illustrated. The averaged experimental values of triboEMF for Al, Ni, Fe, and Cu are given. One of the main tasks of tribology is to evaluate the energy characteristics of the surface layers of friction pairs of brake devices. The fundamental problem of studying the working surfaces of metal friction elements (brake pulleys, drums and discs) is the control of parameters that are interconnected by thermodynamic relationships. A comparison of the triboelectric power for all the metals studied made it possible to compose a series in which any subsequent metal is more electro-negative than the previous one. For the nickel standard, the series has the following form: Fe, Mo, Zn, Al, Cu, Ti, Pb. A comparison of the values from the maximum to the minimum parameters (ρ is the density; c is the specific heat; λ , α are the coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity) for all the metals studied made it possible to compose the series. The first (for ρ): Mo, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ti, Al; the second (for c): Al, Ti, Fe, Cu, Ni, Zn, Mo, Pb; the third (for λ): Cu, Al, Mo, Zn, Fe, Pb, Ni, Ti; the fourth (for α): Cu, Mo, Zn, Pb, Ni, Fe, Ti. Thus, an analysis of the triboelectric characteristics of metals showed that in iron-based alloys, one can expect a change in the triboelectric power depending on the type of alloying elements and their amount in the alloy. A multifactorial method of selecting friction materials for friction pairs of brake devices has allowed the formation of triboEMF series and the thermophysical characteristics of various metals to reduce potential difference jumps due to a new approach to the formulation of impurity components in metal friction products.

Key words: braking devices, friction pairs, friction material, triboEMF, potential.

References

1. Fomenko V.S. Emissionnyye svostva materialov. Spravochnik / V.S. Fomenko. – K. Naukova Dumka, 1981, - 336 s.
2. Samsonov G.V. Svoystva elementov. Fizicheskiye svoystva. Spravochnik / G. V. Samsonov. – M. Metallurgiya, 1976. – 600 s.
3. Belokur I.P. Defektoskopiya materialov i izdeliy / I.P. Belokur, V.A. Kovalenko – K. Naukova Dumka, 1989. – 192 s.
4. Grigor'yev S.V. Primeneniye termoelektricheskogo metoda sortirovki promyshlennykh staley / S.V. Grigor'yev, N.V. Rusanova, V.M. Yershov. – Sbornik nauchnykh trudov DonGTU. – Alchevsk: Lado, 2008 - №27. – S. 324 – 329.
5. Sopronyuk P.M. Diagnostika materiallov i sred. Energeticheskiye kharakteristiki poverkhnosti slojev / P.M. Sopronyuk, V.M. YUzevych. – L'vov: FMI im. G.V. Karpenko NAN Ukrainy, iz-vo «SPOLOM». – 2005. – 292 s. - . – 2005. – 292 s. – a ukr. YAz.
6. Energeticheskiye urovni razlichnykh tipov kontaktov mikrovystupov par treniya / M.V. Kindrachuk, A.I. Vol'chenko, D.A. Vol'chenko, V.S Skrypnik, A.V. Voznyy // Fiz.-khim. mekhanika materialov – 2018. - №6. – S.83 – 90.